

УДК 007; 681.3

А.В. Клименко, И.В. Максимей, В.С. Смородин

СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА

Рассматриваются вероятностные технологические процессы производства с нестандартной последовательностью смены состояний. Излагаются особенности последовательных вероятностных процессов как объекта имитации, состав и структура системы моделирования. Предложена технология использования системы моделирования и определены перспективы ее применения.

Введение

Моделированию технологических процессов производства (ТПП) постоянно уделяется значительное внимание. При этом предполагается, что выполнение микротехнологических операций ($МТХО_{ij}$), $i, j = \overline{1, N}$, осуществляется на основе детерминированных характеристик расхода ресурсов и времени их выполнения [1, 2]. В таких случаях для их моделирования используются аналитические модели типа сетевых графиков [3] или модели теории расписаний [4]. Однако на практике при моделировании на основе детерминированных характеристик $МТХО_{ij}$ зачастую трудно верифицировать модели ТПП из-за вероятностного характера использования их ресурсов, времени и стоимости выполнения технологических операций. Поэтому для исследования вероятностных технологических процессов производства (ВТПП) нами разработаны средства и технологии имитации на основе аппарата вероятностных сетевых графиков (ВСГ), позволяющие оперативным образом исследовать варианты организации ВТПП [5, 6, 7]. Данные средства и технологии их использования требуют от исследователя знания функций распределения расхода времени и стоимости операций, а также использования ресурсов предприятия для выполнения каждой $МТХО_{ij}$. В тех случаях, когда исследователю известны функции распределения вероятностных характеристик расхода ресурсов, в качестве средства имитации можно использовать систему автоматизации имитационного моделирования

(САИМ) [6], реализующую агрегатный способ имитации сложных систем в комбинации с процедурами сетевого планирования и метода статистических испытаний [3].

В ряде случаев для ТПП бывает трудно выделить отдельные технологические операции и определить порядок их следования. Данная ситуация имеет место либо из-за недостаточной изученности производства (что обычно случается при первоначальном проектном моделировании ТПП), либо в силу сложной многофункциональной зависимости микротехнологических операций ($МТХО_{ij}$). Однако, для таких случаев может оказаться, что интегральные состояния ТПП как результат многочисленных взаимодействий $МТХО_{ij}$ представляют собой последовательную цепь событий. Подобные технологические процессы обычно называются последовательными. На практике последовательные процессы часто удается представить в виде полумарковских моделей (ПММ). При этом переход производственной системы из состояния i в состояние j определяется матрицей вероятностей перехода $\|p_{ij}\|$, а времена нахождения ТПП в каждом из состояний определяются функцией условного распределения $F_{ij}(\tau)$ времени нахождения системы в состоянии j при переходе в него из состояния i . Перед исследованием задается вектор вероятностей начальных состояний V_0 и вектор вероятностей завершающего состояния V_k .

Начальное состояние (i_0) разыгрывается по жребию 1-го типа с помощью вектора v_0 [3]. Аналогичным образом разыгрывается конечное состояние (i_k) по вектору v_k , $k = \overline{1, N}$. В ряде случаев, особенно при малой вероятности достижения конечного состояния (p_k) бывает трудно моделировать редкие события. Поэтому стараются задать функцию $F_0(v)$ распределения количества смен состояний, по которой разыгрывается число (v_l) смен состояний в l -й реализации ППМ. При выполнении условия $v_l = 0$ определяется момент окончания моделирования ПММ. Второй сложностью моделирования реальных ТПП с помощью аппарата полумарковских процессов является необходимость нестандартного перехода из состояния i в состояние j .

Стандартными переходами в ПММ назовем возможность выбора состояния j после состояния i по матрице вероятностей перехода $\|p_{ij}\|$. На практике в процессе функционирования ВТПП часто возникают такие нестандартные ситуации как необходимость резервирования устройств оборудования, перевода оборудования на общую профилактику, ликвидации поставочной обстановки. Определить вероятности перехода в такие состояния заранее при построении ПММ довольно трудно. Поэтому требуется нестандартный переход в данные состояния из любых состояний, инициированных по матрице $\|p_{ij}\|$. Для данной цели при имитации состояний непрерывно анализируются суммарные значения времени наработки Q_{nr} устройств оборудования и ситуации возникновения аварий ($\pi_{av} = 1$). При определенных значениях пары показателей (Q_{nr}, π_{av}) определяется необходимость нестандартного решения с указанием детерминированного перехода в соответствующие состояния. Подобная ситуация определяет структуру графа переходов ТПП из состояния i в состояние j ,

которая отлична от обычных вариантов перехода по матрице $\|p_{ij}\|$.

Для реализации изложенной технологии имитации ВТПП специализированных средств автоматизации имитационного эксперимента нет. Поэтому актуальна разработка специализированной системы имитационного моделирования для таких ВТПП, которые по своей сути являются последовательными и о поведении которых исследователь имеет только интегральную информацию. В данной работе на основе анализа особенностей вероятностных ТПП последовательного типа излагается метод исследования, представляющий собой комбинацию метода Монте-Карло, полумарковских процессов и процедур исследования текущей операционной обстановки ВТПП. Излагаются состав и структура системы моделирования последовательных процессов (СМПП). Предложена технология использования СМПП и перспективы её применения при проектном моделировании ВТПП.

1. Особенности последовательных ВТПП как объекта имитации

Объектом имитации является вероятностный ТПП, о поведении которого известны только состав его интегральных состояний и условия перехода из i -го состояния $SOST_i$ в j -е $SOST_j$. Основная доля переходов ВТПП из состояния в состояние может быть представлена как полумарковский процесс. Длительности τ_{ij} нахождения ВТПП в состоянии j могут быть представлены полумарковской моделью (при условии перехода из состояния i в состояние j). Известен также расход ресурсов вероятностного ТПП в каждом состоянии ($j = \overline{1, 10}$). Такими состояниями будут:

$j = 1$ – нормальное выполнение ТПП без использования ресурсов и оборудования;

$j = 2$ – нормальное выполнение с использованием ресурсов без оборудования;

$j = 3$ – нормальное выполнение ТПП с использованием ресурсов и использованием безотказного оборудования;

$j = 4$ – возникновение простых отказов оборудования и использование ресурсов;

$j = 5$ – возникновение простых аварий с использованием ресурсов;

$j = 6$ – возникновение сложных аварий с использованием ресурсов;

$j = 7$ – ликвидации аварий на оборудовании ТПП последовательностью процессов $\{PR.PROC_k\}$, $k = \overline{1, L}$;

$j = 8$ – переход на общую профилактику оборудования;

$j = 9$ – одиночное резервирование устройств оборудования ТПП;

$j = 10$ – общее резервирование устройств оборудования.

Граф переходов состоит из десяти узлов, каждый из которых является представителем связи соответствующего процесса-имитатора состояния ($PR.SOST_{ij}$,

$i, j = \overline{1, 10}$) с остальными процессами. Процесс $PR.UZEL$ связан двояким образом: стандартным образом (по матрице $\|p_{ij}\|$) и нестандартным образом с остальными типами процессов. Как видим, в графе переходов ВТПП имеется всего 10 состояний (от $PR.SOST_1$ до $PR.SOST_{10}$). Поскольку функции всех узлов ($UZEL_i$) одинаковы, то их можно объединить одним и тем же процессом $PR.UZEL$, который является реентерабельной программой и будет обеспечивать последовательное функционирование всех десяти узлов. Для каждого из процессов состояний также необходима соответствующая реентерабельная программа.

На рисунке показана схема взаимодействия процессов состояний в ПММ ВТПП, являющихся реентерабельными программами. На данном рисунке также показано взаимодействие остальных процессов-имитаторов функций устройств оборудования с процессами состояний $PR.SOST_{ij}$.

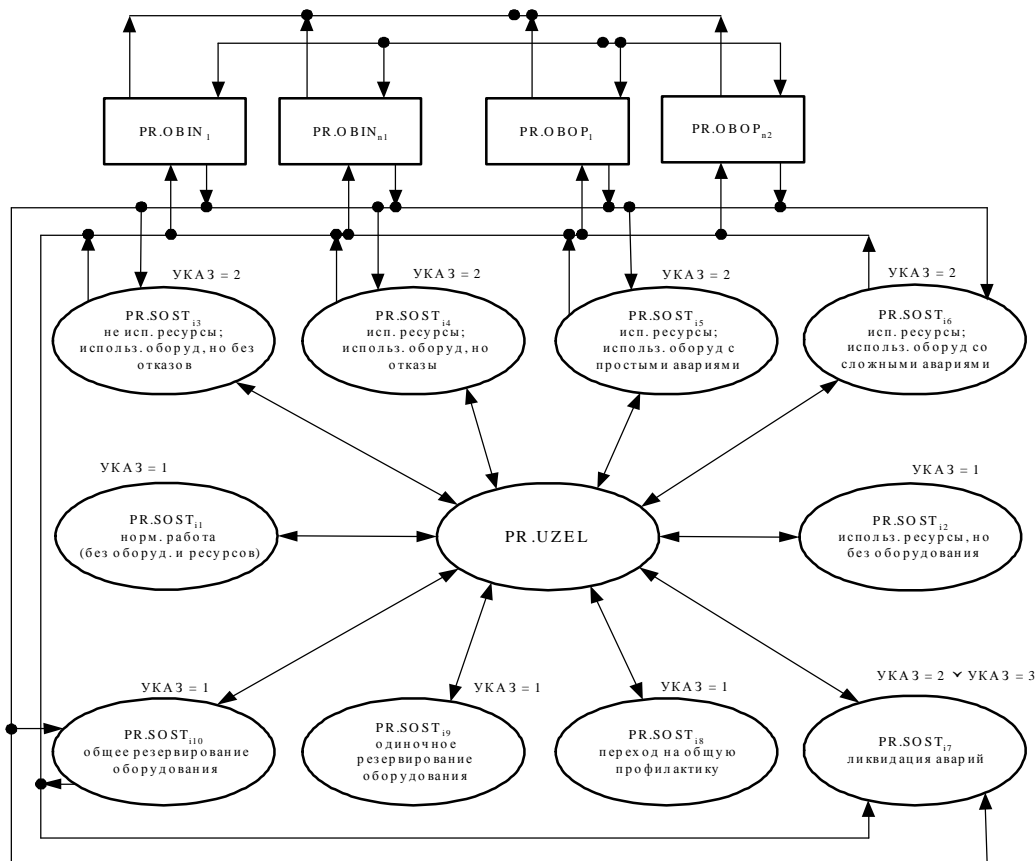


Рисунок. Схема взаимодействия процессов в последовательном ВТПП

2. Формализация последовательного ВТПП

Для отображения переходов ВТПП из состояния в состояние используется ПММ (при стандартных состояниях) с указателем (*Ukaz*) нестандартных ситуаций (наличия аварий и использования устройств оборудования для их ликвидации). Для выбора номеров состояний ВТПП процессом *PRUZEL* необходимо задать такие глобальные переменные и параметры моделирования:

$\|p_{ij}\|$ – матрицу вероятностей перехода из состояния в состояние;

V_0, V_k – векторы вероятностей начального и конечного состояний ВТПП;

$F_0(v)$ – функцию распределения количества смен состояний в l -й реализации ПММ;

$\|Q_{nrkj}\|$ – матрицу граничных значений времени наработки оборудования номера k в j -м состоянии ВТПП;

$\|F_{1ij}(\tau)\|$ – матрицу функции условного распределения времени нахождения в j -м состоянии после i -го состояния ВТПП;

$\|F_{2ij}(C)\|$ – матрицу функции условного распределения стоимости выполнения ВТПП в j -м состоянии следующим за i -м;

$\|p_{avkj}\|$ – матрицу вероятности возникновения аварий при использовании номера k в j -м состоянии ВТПП;

$\|F_{3kj}(\tau_{BO})\|$ – матрицу функции распределения длительности безотказной работы k -го устройства оборудования в j -м состоянии;

$\|F_{4kj}(\tau_{VO})\|$ – матрицу функции распределения интервала восстановления работоспособности k -го устройства в j -м состоянии;

$\|F_{5kj}(\tau_{AV})\|$ – матрицу функции распределения интервала ликвидации аварийной ситуации k -го устройства в j -м состоянии.

Статистиками имитации для l -й реализации имитационной модели (ИМ) ВТПП в j -м состоянии являются:

T_{plj}, C_{plj} – время и стоимость нахождения в j -м состоянии;

T_{vlj} – суммарное время восстановления работоспособности оборудования;

T_{alj} – суммарное время ликвидации аварии оборудования.

В ходе l -й реализации выполняется построение следующих графиков и диаграмм:

GKO_l – график расхода комплектующих изделий;

GMT_l – график расхода материалов;

$DIOR_{kl}$ – диаграмма изменения во времени остатка общих ресурсов k -го номера;

$DIIR_{kl}$ – диаграмма использования индивидуальных ресурсов k -го номера;

$DIOO_{kl}$ – диаграмма изменения во времени остатка места на общем оборудовании номера k ;

DIO_{kl} – диаграмма использования индивидуального оборудования номера k .

Откликами имитации ИМ ВТПП согласно процедуре Монте-Карло являются:

– усредненные по всем реализациям времена и стоимости нахождения ВТПП в j -х состояниях

$$T_{pj}^0 = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N T_{plj}; T_{Cj}^0 = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N C_{plj}; \quad (1)$$

– общее значение времени и стоимости реализации ВТПП

$$T_{p0}^0 = \sum_{j=1}^{10} T_{pj}^0; T_{C0}^0 = \sum_{j=1}^{10} T_{Cj}^0; \quad (2)$$

– общие значения времен восстановления и ликвидации аварий в процессе реализации ВТПП

$$T_{VO} = \sum_{j=1}^{10} \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N T_{VOlj}; T_{AV} = \sum_{j=1}^{10} \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N T_{AVlj}. \quad (3)$$

После усреднения результатов имитации согласно процедуре Монте-Карло формируются интегральные статистики имитации в виде:

графиков расхода комплектующих изделий (GKO_0) и материалов (GMT_0);

диаграмм изменения остатка на общих ресурсах и оборудовании ($DIOR_{k0}$ и $DIOB_{k0}$);

диаграмм изменения использования индивидуальных ресурсов и оборудования ($DIIR_{k0}$ и $DIIO_{k0}$).

Цель имитации ВТПП – минимизация компонентов вектора (T_{p0} , T_{C0} , T_{B0} , T_{A0}). Вариант h -й организации ВТПП – лучший, у которого меньшее значение функционала, вычисляемого по формуле:

$$\Phi_{0h} = \beta_1 T_{p0}^* + \beta_2 T_{C0}^* + \beta_3 T_{B0}^* + \beta_4 T_{A0}^*, \quad (4)$$

где $0 \leq \beta_i \leq 1$ – весовые коэффициенты важности $\left(\sum_{i=1}^4 \beta_i = 1 \right)$, T_{C0}^* , T_{p0}^* , T_{B0}^* , T_{A0}^* – нормированные значения стоимости, времени выполнения, времени восстановления функционирования и времени ликвидации аварии.

3. Особенности имитации последовательного ВТПП

Согласно рисунку, нахождение ВТПП в каждом из десяти состояний можно представить взаимодействием двух процессов $PR.UZEL$ и $PR.SOST_{ij}$ ($i, j = \overline{1, 10}$). Вначале $PR.SOST_{ij}$ ожидает активизации процессом $PR.UZEL$. В момент модельного времени t_0 при запуске $PR.SOST_{ij}$ процессом $PR.UZEL$ передается номер следующего состояния (j). По таблице $TPSOST_{ij}$ признаков использования ресурсов в состоянии ij определяется строка признаков ($\pi_{R_{ij}} - \pi_{R_{9ij}}$) текущего использования ресурсов. Если $\pi_{R_{Sij}} = 1$, то ресурс номера S заказывается для имитации состояния S_{ij} (когда $\pi_{ij} = 1$). В противном случае (при $\pi_{R_{Sij}} = 0$) заказ ресурса не производится. Далее фиксиру-

ется время ожидания выполнения состояния ij (τ_{wij}), формируется таблица заказа ресурсов $TZRES_{ij}$. Параллельного использования ресурсов нет и, следовательно, нет конкуренции за ресурсы. Ведется только учет расхода ресурсов, предполагая при этом, что для реализации ТПП достаточно ресурсов. Сформировав строку заказа ресурсов ($R \leq 9$) в $TZRES_{ij}$, фиксируется список ресурсов, использование которых в состоянии ij необходимо отобразить и учесть данное их наличие в таблице $SPRES$. Далее осуществляется запуск процессов-имитаторов функций оборудования индивидуального использования.

На следующем шаге алгоритма имитации иницируются процессы-имитаторы оборудования индивидуального пользования. Затем иницируются процессы-имитаторы общего пользования ресурсов в ij -м состоянии. Процесс имитации при этом переходит в состояние ожидания окончания работы оборудования. Если какой-либо процесс-имитатор оборудования не завершил имитацию выполнения, то происходит автостоп процесса $PR.SOST_{ij}$. При каждом завершении имитации своей работы процессы-имитаторы оборудования ($PR.OBIN$ и $PR.KAN$) через управляющую программу моделирования (УПМ) возобновляют работу алгоритма $PR.SOST_{ij}$. Как только имитация завершена всеми устройствами-имитаторами оборудования, алгоритм процесса по таблице ресурсов $TZRES_{ij}$ выбирает функцию распределения $F_{10ij}(\tau)$ длительностей нахождения в состоянии ij . С помощью жребия 3-го типа [3] разыгрывается время τ_{ijl} нахождения процесса в состоянии ij при l -м использовании функции распределения. Определяется момент активизации по времени состояния ij ($t_{aktij} = t_S + \tau_{ijl}$). Проверяется ситуация: устройства оборудования закончили имитацию раньше момента перехода процесса по времени, разыгранном по функции распределения $F_{10ij}(\tau)$. Если $t_0 \leq t_{akt}$, то опре-

деляется величина остатка времени имитации ($t_{ost} = t_{akt} - t_0$). Далее осуществляется имитация нахождения в состоянии ij с помощью оператора квазипараллелизма $WAIT(ij, t_{ost}, D_4, M_i)$. По окончании этой имитации в момент $t'_0 = t_0 + t_{ost}$ УПМ активизирует $PR.SOST_{ij}$, после чего фиксируется статистика τ_{wij} нахождения ТПП в состоянии ij и осуществляется учет использования ресурсов оборудования. На этом очередной квант выполнения алгоритма процесса $PR.SOST_{ij}$ завершается и производится запуск процесса $PR.UZEL$. Для розыгрыша следующего номера состояния процесса стандартным способом используется матрица $\|p_{ij}\|$ вероятностей переходов модели ТПП. При этом процесс $PR.UZEL$ возобновляет работу алгоритма $PR.SOST_{ij}$, переходит в ожидание запуска $PR.UZEL$, и выполнение алгоритма повторяется согласно вышеописанной последовательности процедур. Для тех случаев, когда после состояния ij необходим нестандартный переход на экстремальные состояния, формируется первый указатель ситуации в виде переменной связи с $PR.UZEL$ ($Ukaz = 1$). В тех состояниях, во время имитации которых имела место авария на оборудовании, формируется второй указатель ситуации в виде переменной связи с $PR.UZEL$ ($\pi_{AV} = 1$). Во всех остальных ситуациях указатели обнуляются ($\pi_{AV} = 0$ и $Ukaz = 0$).

Имитация переходов ВТПП из состояния в состояние в процессе $PR.UZEL$ осуществляется таким образом. В момент модельного времени t_0 происходит запуск процесса процедурой Монте-Карло l -й реализации ИМ ТПП. С помощью справочника полумарковской модели $SPMM$ определяются состояния полумарковской модели ТПП. При начальном запуске в справочнике TBD определяются: вектор вероятностей начального состояния модели (v_0), с помощью которого вычисляется номер начального состояния

ПММ (i_0); вектор вероятностей конечного состояния модели (v_k), с помощью которого определяется номер конечного состояния ПММ (i_k); функция распределения $F_0(v)$ числа v_l смен состояний ПММ, с помощью которой определяется число смен состояний ПММ в l -й реализации. При очередном использовании ПММ восстанавливается начальное состояние ПММ в l -й реализации: номер предыдущего состояния ПММ (π_{AV}), указатель на возможность перехода ПММ, розыгрыш по матрице переходных вероятностей ($UKAZ$). Далее повторяется цикл розыгрыша номера следующего состояния ПММ по матрице $\|p_{ij}\|$, который затем многократно выполняется для случая, когда $V_l > 0$ (т.е. при повторном запуске ПММ). По матрице $\|p_{ij}\|$ для существующего номера текущего состояния (i) формируется номер состояния (j), который запоминается в справочнике $SPMM$. Далее с помощью процедуры выбора осуществляется либо стандартный запуск процессов номера $0 \leq j \leq 6$ (согласно матрице $\|p_{ij}\|$), либо нестандартный запуск процессов ($j \geq 7$). Такими процессами, включаемыми по значениям характеристик предыдущего состояния ($UKAZ$) и указателя на наличие аварийной ситуации ($\pi_{AV} = 1$), являются имитаторы состояний: ликвидации аварий ($PR.SOST_{i7}$); перехода на общую профилактику ($PR.SOST_{i8}$); одиночного резервирования ($PR.SOST_{i9}$); общего резервирования оборудования ($PR.SOST_{i10}$). Подобным образом активизируется один из процессов номера ($j = 1 \div 10$). Затем следуют проверки условия завершения l -й реализации и выполнения условия $l \leq N_M$, где N_M – количество реализаций ИМ ПММ. Если условия завершения l -й реализации имитации согласно процедуре Монте-Карло не выполняются, то процесс $PR.UZEL_j$ останавливается и переходит в состояние ожидания повторного запуска

процессом $PR.SOST_{ij}$. В ходе имитации выполнения процесса $PR.UZEL_j$ в TBD накапливается статистика жизни данного процесса: суммарное время процесса жизни (T_{sumjk}) и число переходов ПММ в состояние $PR.SOST_{ij}(n_{sum})$ в l -й реализации.

Если в ходе имитации процесса $PR.SOST_{ij}$ одним из процессов $PR.OBIN_{r1}$ или $PR.OBOP_{r2}$ был выработан признак «произошла авария», то этот факт указывается в переменной связи ($\pi_{AV} = 1$). Вторая глобальная переменная связи процессов $PR.UZEL_j$ и $PR.SOST_{ij}$ принимает значение $Ukaz = 1$, показывая, что по завершении $PR.SOST_{ij}$ имитация переходит на стандартную смену процессов, согласно матрице переходных вероятностей $\|p_{ij}\|$. Во всех остальных случаях в глобальной переменной связи $UKAZ$ содержится заказ на переход к нестандартным состояниям ПММ: ликвидации аварий ($PR.SOST_{i7}$), переходу на общую профилактику ($PR.SOST_{i8}$), одиночное резервирование ($PR.SOST_{i9}$) или общее резервирование оборудования ($PR.SOST_{i10}$). В базе данных процесса $PR.UZEL_j$ (TBD) хранится информация о структуре полумарковского процесса: по адресу α_4 хранится матрица вероятности перехода ПММ из состояния в состояние $\|p_{ij}\|$; по адресу α_2 хранится функция распределения $F_0(v)$ числа смен состояний ПММ, по которой формируется число v_l смен состояний ПММ в l -й реализации; по адресу α_3 находится вектор вероятностей переходов в конечное состояние ($v_k = \{p_{k1}, \dots, p_{km}\}$); по адресу α_1 находится вектор вероятностей начального состояния ($v_{0H} = \{p_{01}, \dots, p_{0m}\}$).

При отображении функций ВТПП необходима имитация работы оборудования. Функционирование оборудования моделируется путем отображения взаимодействия процесса $PR.SOST_{ij}$ с процес-

сами-имитаторами оборудования трех типов: индивидуального использования ($PR.OBIN_{r1}$), общего использования ($PR.OBOP_{r2}$), моделирования использования каналов на общем оборудовании ($PR.KAN_{r2}$). Предполагается, что в каждом ij -м состоянии устройства-имитаторы оборудования индивидуального и общего использования (соответственно номера $r1$ и $r2$) могут находиться, в свою очередь, в следующих состояниях: нормальная работа ($SOST_{r1} = 1$); самовосстанавливающийся отказ функционирования, требующей для восстановления его работоспособности только интервала $\tau_{VO_{r1}}$ ($SOST_{r1} = 2$); отказ функционирования, который приводит к аварии, требующий ещё интервала ликвидации обычной аварии $\tau_{AV_{r1}}$ ($SOST_{r1} = 3$); отказ функционирования, приводящий к сложной аварии, для ликвидации которой необходимо не только время восстановления $\tau_{VO_{r1}}$, но и использование последовательности процессов-имитаторов процедуры ликвидации аварии $\{PR.PROC_k\}$ ($SOST_{r1} = 4$).

4. Состав и структура системы моделирования последовательных ВТПП

Для автоматизации этапов построения ИМ ВТПП последовательного типа и постановки серий имитационных экспериментов (ИЭ) согласно процедуре Монте-Карло разработана система имитации последовательных процессов (СИПП), основанная на процессном способе организации квазипараллелизма. СИПП состоит из управляющей программы моделирования, библиотеки процессов-имитаторов ($LIB.PROC$), подсистемы реализации ИЭ согласно процедуре Монте-Карло ($PS.MONTEK$), подсистемы обработки результатов имитации ПММ ($PS.OBRABOT$), процедуры визуализации результатов ИЭ ($PR.VIZUAL$). Управление взаимодействием процессов $PR.SOST_{ij}$ и $PR.UZEL$ обеспечивается УПМ с помо-

щью операторов организации квазипараллелизма на основе процессного способа имитации. Каждый процесс представляет собой объединение нескольких программ активностей, заканчивающихся одним из операторов синхронизации и возвращающим управление УПМ. Для компоновки процессов в ИМ ПММ исследователю достаточно указать только исходную информацию для имитации ВТПП полумарковской моделью. Последовательный характер следования процессов *PR.UZEL* и *PR.SOST_{ij}* позволил ограничиться только двумя программами этих процессов, обеспечив при этом необходимое количество узлов и переходов ПММ из состояния в состояние за счет дублирования информации в базе данных ПММ, необходимой для имитации ВТПП в каждом состоянии. Данные две программы являются реентерабельными, чем обеспечивается выполнение всех *PR.SOST_{ij}*. Алгоритмическая часть процессов-имитаторов реализована в среде системы программирования *Delphi 5.0* [6]. Поэтому язык моделирования СИПП представляет собой расширение объектно-ориентированного языка программирования *Object Pascal* за счет добавления типовых операторов организации квазипараллелизма между компонентами ИМ: «ждать», «запустить», «продолжить», «остановить». Организация взаимодействия данных процессов обеспечиваются УПМ на основании использования следующих операторов: пуска процессов, продолжения выполнения процессов, ожидания выполнения условий активизации процессов, ожидания времени выполнения процессов. После установки операторов взаимодействия процессов алгоритм их выполнения прерывается, что означает окончание соответствующей активности процесса и возврат из программы процесса на УПМ. Каждый оператор взаимодействия процессов становится в собственную очередь на активизацию, которую УПМ обслуживает согласно с установленными приоритетами. Выбор из очереди запроса осуществляется при одном и том же модельном времени

t_0 . По информации в запросе формируется адрес передачи управления согласно активности процесса. После просмотра всех очередей и реализации запусков алгоритма процессов инициируется процедура возврата ресурсов ВТПП, выделенных процессами *PR.SOST_{ij}*. Проверяется выполнение всех условий ожидания процессов и запуска тех активностей, у которых завершались условия выполнения запросов на активизацию. В основу изменения модельного времени положен способ организации квазипараллелизма «до ближайшего события» в модели. Проверяется условие окончания моделирования в двух случаях: выполнения условий окончания (процедура «*Option*») и по достижении запланированного интервала времени (T_{mod}).

5. Технология использования СИПП при проектном моделировании ВТПП

Технология использования СИПП реализуется последовательностью следующих этапов создания, испытания и использования ИМ ВТПП.

1 этап. Задается структура ВТПП. Вначале формируется таблица параметров *PR.SOST_{ij}*. Создается таблица коммутации процессов, в которой все элементы упорядочены по возрастанию номеров процессов. Структура сигналов *Sgd* формируется в режиме диалога. Для отображения специфики переходов ПММ из состояния в состояние задаются: матрица вероятностей перехода $\|p_{ij}\|$, векторы вероятностей начального и конечного состояний ПММ $\{v_0\}$ и $\{v_k\}$, функция распределения количества смен состояний $F_0(v_i)$. Для отображения надежностных характеристик оборудования ВТПП задаются матрицы: времени $\|Q_{nr ij}\|$ наработки оборудования; нахождения функций условного распределения времени пребывания ВТПП в текущих состояниях $\|F_{ij}(\tau)\|$;

функций $F_{2ij}(C)$ условного распределения стоимости выполнения ВТПП; вероятностей возникновения аварий на оборудовании номера k в j -м состоянии $\|P_{avkj}\|$; длительностей безотказной работы k -го устройства оборудования $\|F_{3ij}(\tau_{BO})\|$; длительностей интервала восстановления работоспособности номера k $\|F_{4ij}(\tau_{VO})\|$; интервалов ликвидации аварийной ситуации на устройстве k в j -м состоянии ВТПП $\|F_{5ij}(\tau_{AV})\|$.

2 этап. Организуется натурный эксперимент для получения исходной информации и последующей проверки адекватности ИМ реальному ВТПП. Для тех параметров ПММ, которые трудно измерить, используются экспертные оценки их значений. Основную трудность в подготовке исходной информации представляет определение вероятностных характеристик $PR.SOST_{ij}$. В тех случаях, когда не удастся найти аналитический вид для аппроксимирующих функций распределения, используется табличная форма их представления, которая стандартизована для всех типов параметров.

3 этап. Осуществляется запись параметров $PR.SOST_{ij}$ в базу данных модели (BDM). При каждой записи значений параметров происходит их преобразование во внутреннее представление, контроль корректности вводимых значений и вывод результатов контроля для устранения ошибок в описании ВТПП. Взаимодействие исследователя с СИПП осуществляется путём использования программы «меню» в режиме «вопрос–ответ». В итоге этих операций синтаксические ошибки описания ПММ будут исправлены.

4 этап. Таблицы коммутации $PR.SOST_{ij}$ с $PR.UZEL_j$ проверяются на соответствие входов и выходов процессов. Любое дублирование немедленно фиксируется, и формируется соответствующее сообщение исследователю на дисплей. По окончании этапа исследователю выдаётся структура таблиц коммутации, в которой отсутствуют синтаксические ошибки.

5 этап. Происходит инициализация и верификация базового варианта ИМ. Задаётся начальный состав ресурсов, материалов, исполнителей и оборудования ВТПП. Указываются условия окончания имитации, число реализаций процедуры Монте-Карло, условия хранения и обработки информации, места хранения результатов ИЭ. Проводится начальный запуск имитации базового варианта ИМ. Для этого имеется возможность в режиме «пошагового» выполнения рассмотреть переходы всех процессов из состояния в состояние с автоматической документацией этого просмотра. В результате обеспечивается верификация ИМ ВТПП. Несмотря на то, что не существует формальных процедур верификации ПММ, в составе СИПП имеются средства автоматизации наиболее трудоёмких процедур верификации ВТПП.

6 этап. Осуществляется испытание и исследование ИМ. Все шаги этого этапа стандартизованы на основе известных методик испытания ИМ сложных систем [8]. Вначале оценивается ошибка имитации ($\varepsilon\%$), представляющая собой максимальный процент ошибок откликов модели. Определяется длина переходного периода имитации (T_s), означающая максимальное время стабилизации того отклика модели, который позже всех других переходит в установившееся состояние. Важной процедурой испытания является проверка «устойчивости» режима имитации. Проверяется отсутствие переходов ИМ ВТПП в такой режим, когда у любого из откликов ИМ возможен рост амплитуды его изменения с ростом модельного времени t_0 . Следующим шагом испытаний ИМ является проверка «чувствительности» откликов к изменениям параметров моделирования. Каждая составляющая вектора параметров модели (X_k) изменяется в диапазоне от минимального (X_k^-) до максимального (X_k^+) значений, а остальные компоненты вектора параметров X_r устанавливаются в середине интервала (X_r^0). Определяется приращение компонентов вектора откликов $\Delta Y_h\%$ и

проверяется их чувствительность к вариациям вектора параметров. Если приращение откликов меньше $\varepsilon\%$, то считают, что ИМ не чувствительна к вариациям вектора параметров. Параметры X_r , которые оказались не «чувствительными», можно в дальнейшем исследовании исключить. Последним шагом этапа испытания является проверка адекватности ИМ. Сравниваются средние значения откликов ИМ и реального ВТПП. Для этого используется методика проверки адекватности, основанная на гипотезе о близости средних значений h -го отклика ИМ и реального ВТПП, которая проверяется с помощью критерия Стьюдента [8].

7 этап. Организуется серия многопрогонных ИЭ согласно процедуре Монте-Карло, в которой каждый ИЭ представляет l -ю реализацию ИМ. После завершения N реализаций ИМ ВТПП в базе данных уже сформированы выборки статистик l -х реализаций. После завершения N опытов на ИМ из статистик имитации вычисляются отклики имитаций. Кроме того, к концу 7 этапа в базе данных СИПП хранятся графики использования материалов и комплектующих изделий, а также диаграммы использования ресурсов и оборудования ВТПП.

8 этап. С помощью подсистемы *PS.OBRABOT* из выборок, хранящихся в базе данных, формируются графики и диаграммы, определяются математические ожидания и дисперсии откликов имитации. С помощью подсистемы *PS.VIZUAL* графики и диаграммы выдаются на печать.

9 этап. Все диаграммы использования ресурсов ВТПП сопоставляются в едином масштабе изменения модельного времени t_0 . По данным графикам и временным диаграммам определяются диапазоны расхода ресурсов ВТПП. Результат сопоставления – отбраковка тех режимов, которые требуют много ресурсов для своей реализации.

10 этап. С помощью подсистемы *PS.RESHEN* анализируются варианты организации ВТПП, для этого попутно решаются такие задачи его проектного моделирования:

- оценка времени реализации ВТПП при имеющихся составе ресурсов и структуре матрицы переходов из состояния в состояние;

- оценка стоимости организации вариантов ВТПП и определение регрессионной зависимости стоимости и времени их реализации;

- анализ влияния надёжностных характеристик оборудования ВТПП на время и стоимость реализации технологического цикла;

- определение вероятностных характеристик реализации ВТПП при известной структуре и надёжности оборудования.

В данной подсистеме реализуются известные методики анализа данных на основе классических критериев принятия решений в условиях неопределённости и риска [9].

Заключение

Изложенный подход к имитации последовательных вероятностных ТПП системой моделирования СИПП и технологии их исследований ориентирован на случай, когда динамику функционирования ВТПП можно формализовать на основе сочетания аппарата полумарковских процессов и процедуры Монте-Карло. Данное обстоятельство сужает область применения СИПП, однако высокий уровень предлагаемой автоматизации исследования, универсальный характер структуры ИМ и простота их описания с помощью ПММ обеспечивают перспективу широкого использования системы имитации при проектном моделировании вариантов организации ВТПП. Наличие у СИПП средств пополнения состава библиотек и подсистем даёт также возможность её применения при проектировании последовательных ВТПП в самых разных предметных областях.

Следует отметить, что гибкость структуры СИПП позволяет организовать оперативное исследование динамики использования ресурсов ВТПП, текущий анализ возможностей и эффективности резервирования производственных ресур-

сов и для повышения надёжности оборудования и безопасности функционирования производственных систем.

1. Михалевич В.С., Кукса А.И. Методы последовательной оптимизации в дискретных сетевых задачах оптимального распределения ресурсов. – М.: Наука, 1983. – 208 с.
2. Майзер Х., Эйджин Н., Тролл Р. Исследование операций. Математические основы и математические методы: Пер. с англ. / Под ред. Дж. Моудера и С. Элмаграби. – М.: Мир, 1981. – Т.1. – 712 с.
3. Жогаль С.И., Максимей И.В. Задачи и модели исследования операций. Ч. 1. Аналитические модели исследования операций: учебное пособие. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 109 с.
4. Браун Р., Мэзон Р., Фламгольц Э. Исследование операций. Модели и применения: Пер. с англ. / Под ред. Дж. Моудера и С. Элмаграби. – М.: Мир, 1981. – Т.2. – 677 с.
5. Максимей И.В., Левчук В.Д., Маслович С.Ф., Попова Е.О., Поташенко А.М., Смородин В.С. и др. Инструментарий имитационного моделирования дискретных вероятностных технологических процессов производства // Проблемы програмування. – 2003. – № 4. – С. 92 – 99.
6. Максимей И.В., Смородин В.С., Сукач Е.И. Система автоматизации экспериментов, реализующая агрегатный способ имитации технологических процессов // Информатика. – 2005. – № 1. – С. 25 – 31.
7. Максимей И.В., Смородин В.С. Методика имитационного моделирования систем управления опасного производства //

Проблемы управления и информатики. – 2005. – № 4. – С. 53–62.

8. Максимей И. В. Имитационное моделирование на ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988. – 222 с.
9. Максимей И.В., Левчук В.Д., Жогаль С.П. Задачи и модели исследования операций. Ч. 3. Технология имитации на ЭВМ и принятие решений: учебное пособие. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 150 с.

Получено 23.07.2007

Об авторах:

Клименко Андрей Валерьевич,
аспирант кафедры математических проблем управления,

Максимей Иван Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедры математических проблем управления,

Смородин Виктор Сергеевич,
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры математических проблем управления.

Место работы авторов:

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины,
246020, Гомель, Беларусь,
ул. Советская, 104.
Тел.: (80232) 60 4237; 56 4237;
e-mail: gsu.unibel.by,
smorodin@gsu.unibel.by.